ChinaXiv合作期刊

doi:10.13866/j.azr.2019.05.09

科尔沁沙地沙丘—草甸梯级生态系统不同气象条件下气候学足迹特征①

黄天宇[1,2]，王冠丽[1,3]，李东方[1,3]，段利民[1,3]，刘廷玺[1,3]

（1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018；
2. 中国中铁二院工程集团有限责任公司，四川 成都 610031；
3. 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018）

摘　要：以内蒙古科尔沁沙地研究区内一条梯级生态带为研究对象，基于大孔径闪烁仪（LAS）通量观测数据和通量源区计算模型，计算、分析了2017年研究区植被生长旺季梯级生态带的水热通量变化和气候学足迹变化。结果表明：① 晴天时地表能量各分支大致呈单峰形，潜热通量曲线略有波动；多云时各能量日变化曲线呈不规则波动状。② 以95%通量贡献源区面积为测算对象，不同风向条件下和不同大气稳定度条件下梯级生态带上气候学足迹面积和位置不同。研究区7月东北、东南、西南、西北4个风向上源区面积分别为0.265 km²、0.538 km²、0.239 km²、0.524 km²。③ 稳定条件下研究区源区面积为0.599 km²，是不稳定条件下源区面积的92%。④ 以95%通量贡献源区面积为测算对象，晴天条件下，由于湍流交换的加强，源区面积由08:00的0.665 km²减小到11:00的0.292 km²；午后，湍流交换减弱，源区面积由14:00的0.283 km²增加到17:00的0.479 km²。气候学足迹变化趋势与大气稳定状况趋势一致。⑤ 以95%通量贡献源区面积为测算对象，受风向、大气稳定度等因素的影响，7月上、中、下旬的气候学足迹不同，源区面积下旬 > 上旬 > 中旬。研究为科尔沁沙地复杂下垫面条件下水热资源的可持续利用、该地区环境保护与恢复提供科学依据和理论支持。

关键词：水热通量；气候学足迹；大孔径闪烁仪；梯级生态带；源区；科尔沁沙地

chinaXiv:201910.00021v1

地—气间相互作用的研究对于各种尺度水热循环、水资源的利用与保护具有重要意义。近年来，不同尺度生态系统水热通量的研究是国内外学者广泛关注的问题[1-2]。由于下垫面条件复杂、现有测量仪器及观测技术的局限性等问题，通量观测尺度及空间代表性成为水热通量研究领域的热点问题[3-4]，对非均一下垫面上气候学足迹的研究是解决该问题的有效方法。目前国内外已有不少学者对不同下垫面上气候学足迹进行了探究，Meijininger等[5]、彭谷亮等[6]、李阳等[7]与宫丽娟等[4]分析了大孔径闪烁仪在农田、果园下垫面下气候学足迹的变化；郑宁等[8]分析了人工混交林的源区与分布；马迪等[9]分析了沙漠绿洲内气候学足迹的变化。但相较于研究较多的农田、果园等下垫面，我国北方干旱、半干旱荒漠地区因其特殊性，使得相关研究较少。

我国荒漠化地区主要分布在内蒙古及西北地区，占地面积广阔，截至2009年底，我国荒漠化土地面积约为 2.62×10^6 km²，占我国国土面积的27.33%。该区生态环境脆弱，受人类活动及气候变化等因素的影响，面临着生态破坏、土壤沙化、水土流失等严峻问题。因此，加强对干旱地区荒漠地带的水热变化与传输的研究，对于解决荒漠化地区水资源短缺、生态环境脆弱等问题至关重要。

科尔沁沙地是我国四大沙地之一，水资源匮乏，植被覆盖度低，受气候变化和人类活动影响严重，下垫面不均一，是我国北方典型的荒漠化地区。本文立足科尔沁沙地典型生态系统沙丘—草甸梯级生态

① **收稿日期：**2018-12-17；　**修订日期：**2019-03-28
基金项目：国家自然科学基金重点国际合作研究、地区项目与重点项目（51620105003，51669017，51769020，51139002）；内蒙古自然科学基金项目（2016BS0514）；教育部创新团队发展计划（IRT_17R60）；科技部重点领域科技创新团队（2015RA4013）、内蒙古自治区草原英才产业创新创业人才团队、内蒙古农业大学寒旱区水资源利用创新团队（NDTD2010-6）；内蒙古自治区高等学校"青年科技英才支持计划"（NJYT-18-B11）资助
作者简介：黄天宇（1994-），男，硕士研究生，研究方向为干旱区水热通量. E-mail：huangtyy@foxmail.com
通讯作者：王冠丽. E-mail：529602904@qq.com

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201910.00021v1

系统，通过对研究区大孔径闪烁仪通量观测数据的研究，探寻植物生长季典型月份该生态系统不同时间尺度的水热通量变化规律及气候学足迹变化，确定不同气象条件下通量源区的变化，了解实际地面贡献源区分布，为进一步了解该生态系统水热传输、提高区域水热资源利用效率奠定基础。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况及站点设置

研究区位于科尔沁沙地东南边缘（122°33′00″～122°41′00″E，43°18′48″～43°21′24″N，图 1），该区域属于半干旱大陆性季风气候，年平均气温 6.6 ℃，多年平均日照时数 2 931.5 h，多年平均降水量 389 mm，降水季节性分配不均匀，主要集中在 6—9 月。该区夏季以西南风为主，多年平均风速 3.2～4.5 $m \cdot s^{-1}$。2017 年 7 月降水量为 81.3 mm，小于往年平均值。该地区地形西高东低，南北高、中部低，海拔 183～231 m。下垫面种类多样，各种下垫面地形呈“阶梯”状分布，是典型的梯级生态系统。

研究区域内设立 5 个气象—土壤环境监测站，各站观测仪器包括：四分量净辐射仪（NR-LITE2，Campbell Scientific，USA）、温湿度测量仪器（HMP155A，Campbell Scientific，USA）、风速风向测量仪器（03B，Campbell Scientific，USA）、土壤热通量板（HFP01sc，Campbell Scientific，USA）、多层位土壤探头（03B，Campbell Scientific，USA）、雨量筒等。相关监测要素由数据采集器（CR1000，Campbell，USA）按 10 min 时间间隔计算其平均值并存储。各监测站及其所处下垫面类型从北至南依次为（表 1）：半流动沙丘差巴嘎蒿群落（A4）、农田玉米地（BC4）、草甸芦苇群落（C4）、小型湖泊（E4）、固定沙丘半灌木—杂草群落（F4）。A4、F4 站安有一套大孔径闪烁仪观测系统（BLS450，Scintec，Germany），其中 F4 为 LAS 发射端，A4 为接收端，仪器架高 8 m，光径长度 2 516 m。

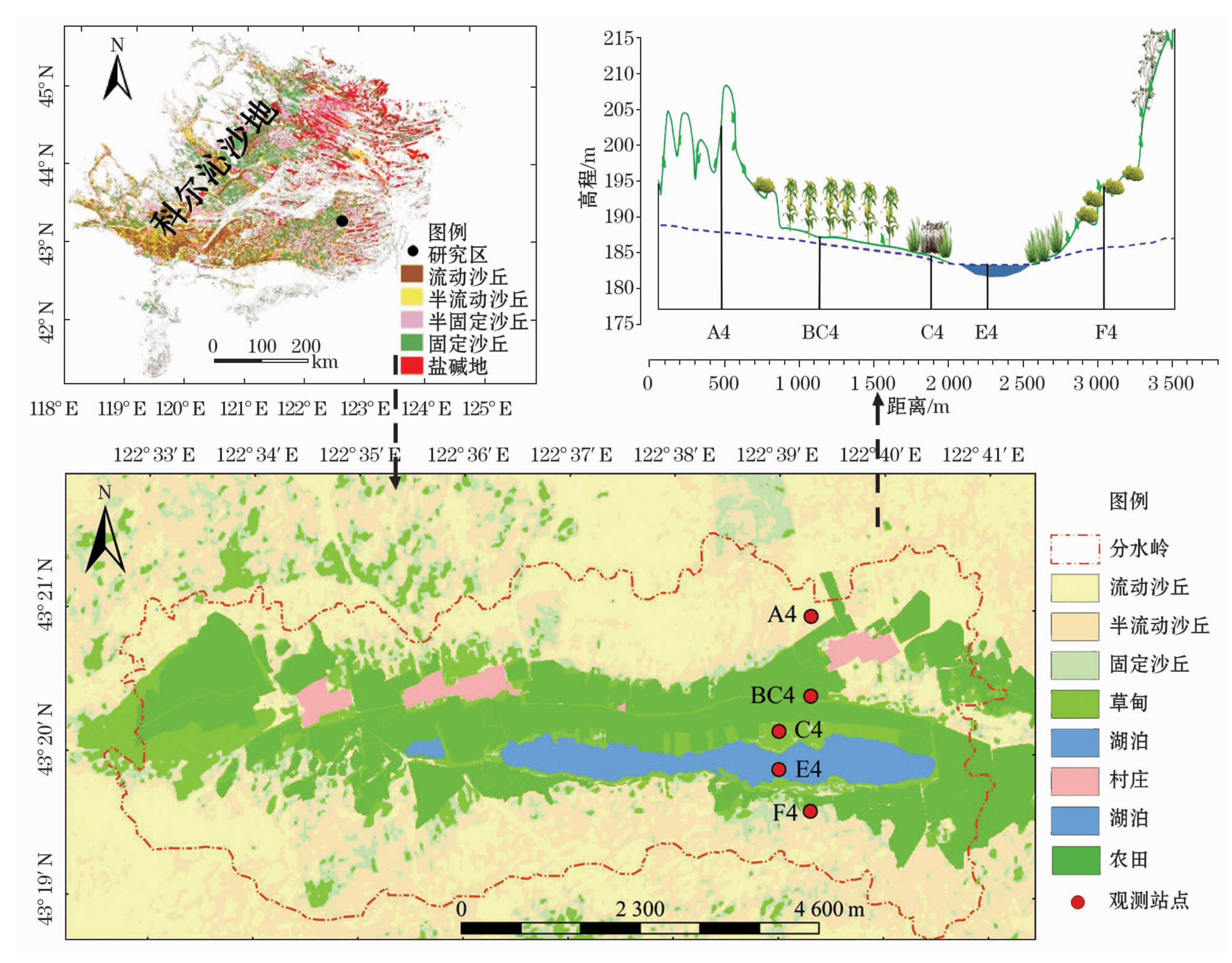


图 1 研究区及站点剖面示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area and profiles of the stations

ChinaXiv合作期刊

表 1　研究区各站点情况

Tab. 1　Information of the stations in the study area

站点	地貌类型	植被群落	高程/m	下垫面面积/m^2	占研究区比例/%
A4	半流动沙丘	差巴嘎蒿	205	4 186 350	39.87
BC4	农田	玉米	189	3 520 650	33.53
C4	草甸	芦苇—碱蒿	184	649 950	6.19
E4	小型湖泊		183	1 164 450	11.09
F4	半固定沙丘	半灌木—杂草	201	820 050	7.81

1.2　研究方法与数据处理

1.2.1　大孔径闪烁仪和监测站点数据　大孔径闪烁仪的原始观测数据为空气折射指数 C_n^2,需经过数据的筛选、剔除、插补、迭代等处理过程获得显热通量 H[10]。筛选数据时,需剔除降雨时段和过饱和时段;对缺失数据进行非线性回归插补,建立显热通量 H 与净辐射 R_n 的回归方程,进而获得较为精准的显热通量数据[11],由于研究区各站点安装有土壤热通量板,因此根据地表能量平衡余项法可计算求得潜热通量。数据整理与分析应用 SRun、JAVA 和 Excel 进行处理,具体计算公式如下:

$$C_T^2 = C_n^2\left(\frac{T^2}{-0.78 \cdot 10^{-6}P}\right)^2\left(1+\frac{0.03}{\beta}\right)^{-2} \quad (1)$$

$$\frac{C_T^2(z-d)^{2/3}}{T_*^2} = f_T\left(\frac{z-d}{L}\right) \quad (2)$$

$$T_* = \frac{H}{\rho_a C_p u_*} \quad (3)$$

$$H = \frac{\rho_a C_p u_*(z-d)^{1/3}T^2}{0.78 \cdot 10^{-6}P\left(1+\frac{0.03}{\beta}\right)}\sqrt{\frac{C_n^2}{f_T\left(\frac{z-d}{L}\right)}} \quad (4)$$

$$LE = R_n - G - H \quad (5)$$

式中:T 为温度;P 为大气压;β 为波文比系数;z 为 LAS 观测高度(m);d 为零平面位移(m)($d=0.667H_{植被}$);L 为莫宁—奥布霍夫长度(m);f_T为温度结构参数的稳定度普适函数;H 为显热通量($W \cdot m^{-2}$);T_* 为温度尺度;ρ_a 为空气密度($kg \cdot m^{-3}$);C_p 为空气定压比热($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$);$u_*$ 为摩擦速度($m \cdot s^{-1}$);LE 为潜热通量($W \cdot m^{-2}$);G 为土壤热通量($W \cdot m^{-2}$);R_n 为净辐射($W \cdot m^{-2}$)。

根据研究区域内不同下垫面类型面积占比,将各站点数据统一成研究区气象—土壤数据。数据的处理经过筛选、剔除、插补等过程,其中,筛选数据时,需剔除观测时段内各站点因电子线路或电源不稳定或环境因素造成的异常观测值,对各站点净辐射间建立回归方程,根据方程对缺失时段数据进行插补,最终获得 30 min 数据进行研究。

研究时段选定在 2017 年 7 月 1—31 日,此时研究区植被繁茂,为植物生长旺季。将预处理的 1 442 个大孔径闪烁仪数据样本按 C_n^2 极小值法[12]划分,得到 831 个稳定和 589 个不稳定样本;将预处理得到的样本按东北(0° ~ 90°)、东南(90° ~ 180°)、西南(180° ~ 270°)、西北(270° ~ 360°)4 个风向划分,分别得到 143、403、777、119 个样本,其中西南风是主风向;将预处理得到的样本按上中下旬划分,分别得到 462、450、480 个旬尺度样本。数据整理与分析采用 Excel 和 Sufer 等软件进行处理。

1.2.2　通量源区足迹模型　本文基于 Kormann 等[13]的研究内容,并参照蔡旭辉等[14]运用的"Flux footprint model for LAS and EC Measurement, FLEM"模式进行通量源区的研究。其中,模型输入参数包括 Obukhov 长度、摩擦速度、平均风速风向、侧向风速标准差、空气动力学粗糙度及有效高度等。该模型可以满足 8 km × 8 km 的源区计算,网格最高分辨率为 5 m。本文计算区域大小包括 LAS 发射端、接收端在内的 3 km × 3.5 km 范围,网格分辨率设定为 10 m,观测有效高度为观测高度减去零平面位移,具体计算公式如下:

$$f_{LAS}(x',y',z_m) = \int_{x1}^{x2} W(x) f(x-x',y-y',z_m)\,dx \quad (6)$$

$$f_c(x,y,z_m) = \sum_{i=1}^{N} f_i(x,y,z_m)\frac{\mathrm{Flux}(i)}{\sum_{i=1}^{N}\mathrm{Flux}(i)} \quad (7)$$

式中:$x1$,$x2$ 分别代表 LAS 发射端和接收端的坐标;(x,y)表示光径上的点;(x',y')表示光径上的点的上风方向各点的坐标;$W(x)$为沿光径路线方向的权重函数;i 为时次序号;N 为计算时段内的总时次数;$f_c(x,y,z_m)$为气候学足迹;$f_i(x,y,z_m)$为 i 时次的足迹;Flux(i)为 i 时次的通量观测值。

2　结果与分析

2.1　水热通量日变化

选取研究时段内典型晴天、多云天各一天,分析净辐射(R_n)、感热通量(H)、潜热通量(LE)和土壤热通量(G)的日变化特征。其中,晴天选择 2017 年 7 月 14 日,多云天选择 7 月 13 日(多云天)。地表能量各项分支日变化如图 2 所示。

chinaXiv:201910.00021v1

ChinaXiv合作期刊

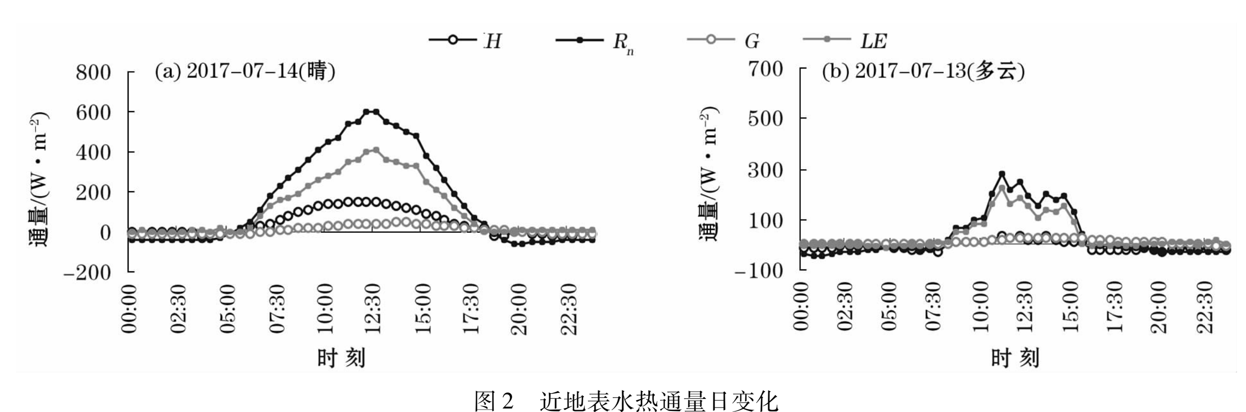


图 2　近地表水热通量日变化

Fig. 2　Daily variation of water and heat fluxes near earth surface

由图 2 可知,晴天条件下地表能量各项分支大体呈单峰形,白天各分支波动明显,夜间则基本无波动,说明地—气间能量交换主要发生在白天。潜热通量曲线在午后出现波动,这是因为研究区在午间植被受到的辐射较强,蒸腾加强,导致植被部分气孔关闭,出现“午休现象”。净辐射、显热通量、潜热通量均在午间前后达到最大值,而土壤热通量的峰值则滞后 1 ~ 1.5 h,潜热通量的峰值显著大于显热通量和土壤热通量,说明此时潜热通量是地表能量耗散的主要形式。多云条件时各地表能量分支呈不规则波动状,土壤热通量曲线波动较小,说明土壤热通量日变化受天气影响较低,多云条件下各分支峰值均低于晴天条件下各分支峰值,说明多云条件下湍流能量交换小于晴天时段。

2.2　不同风向下源区的变化

将研究时段内通量样本按不同风向划分,整理后得到研究区不同风向上通量源区图。由图 3 所示,不同风向上研究区通量源区位置、面积均不同,以 95% 源区面积计算,东北(N-E)、东南(S-E)、西南(S-W)、西北(N-W)4 个风向上源区面积分别为 0.265 km^2、0.538 km^2、0.239 km^2 和 0.524 km^2,各风向源区均处于长约 2 000 m,宽约 500 m 的条带内。因为仪器安置方向为东北、西南方向,光径与 N-E、S-W 风向的夹角角度小于 S-E、N-W 风向上的角度,导致源区在 S-E、N-W 风向上的面积大于源区在 N-E、S-W 风向的面积。可见,LAS 光径在垂直于风向位置时仪器观测的源区面积较大,更能发挥其观测面积广的优势。

2.3　湍流稳定与不稳定条件下源区的变化

将研究时段内通量样本按不同稳定度条件划分,整理后得到研究区不同稳定度条件下的通量源区图,对比湍流稳定条件下与不稳定条件下研究区气候学足迹,结果如图 4 所示。当以 95% 源区面积为计算对象时,湍流稳定状态下与不稳定状态下源区位置变化不大。其中稳定状态下研究区源区面积为 0.599 km^2,小于不稳定状态下源区面积,且是其面积的 92% 。结合研究区下垫面类型来看,湍流不稳定状态下源区内北侧沙丘面积和农田下垫面占比稍大于湍流稳定状态。

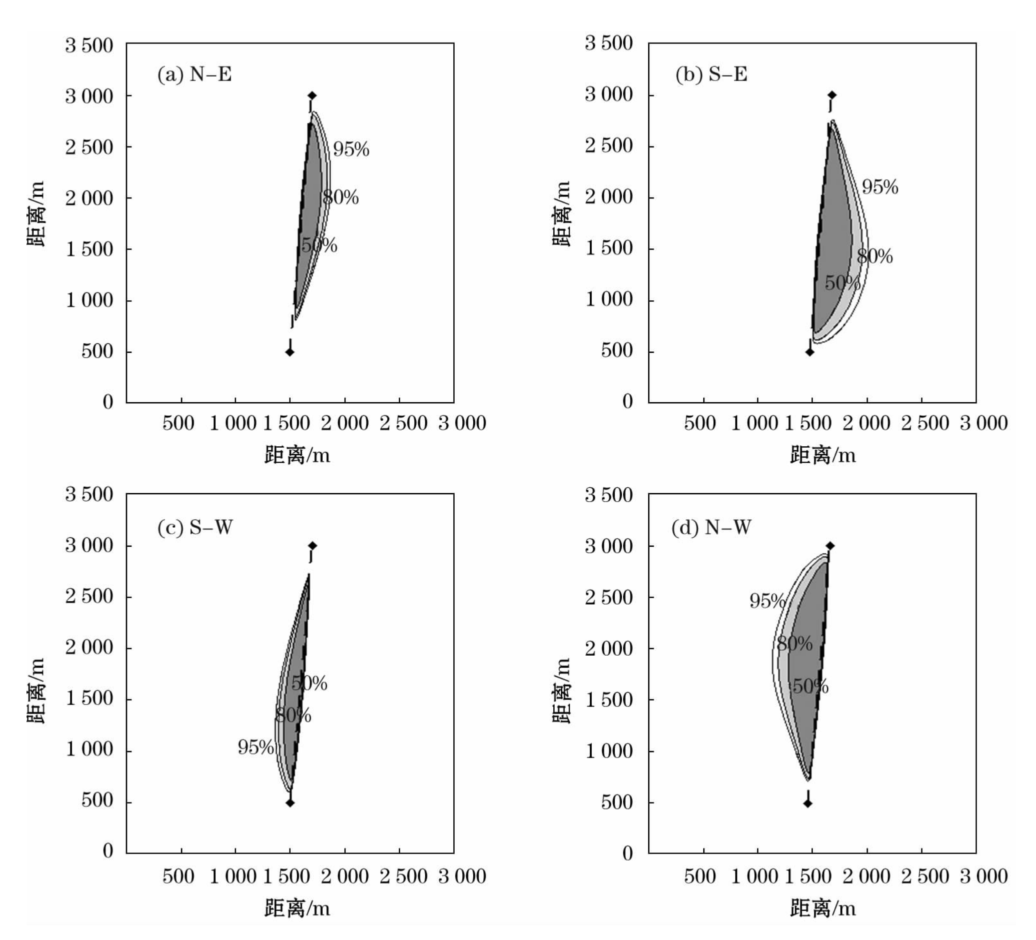
2.4　不同时间尺度上源区的变化

2.4.1　*日尺度源区变化*　仍以 2017 年 7 月 14 日典型晴天为例,分析日尺度气候学足迹变化,如图 5 所示,该日上午以西南风为主,午后由西南风转为西北风。该日上午随着太阳的逐渐升高,环境温度升高,地—气间能量交换逐渐频繁、加强,源区面积由 08:00 的 0.665 km^2 减小到 11:00 的 0.292 km^2;午间前后地—气间能量交换达到一天内的最大值,此后逐步减弱,日落后湍流交换逐步稳定,大气由不稳定状态转换为较为稳定的状态。在此过程中源区面积由 14:00 的 0.283 km^2 增加到 17:00 的 0.479 km^2。7 月 14 日研究区气候学足迹均分布在光径左侧,这与当日的风向变化一致,源区面积的日变化与一天内湍流变化强弱趋势一致。

2.4.2　*旬尺度源区变化*　利用 2017 年 7 月上、中、下旬的观测数据,计算研究时段各旬尺度气候学足迹(图 6),受当地风向条件影响,7 月各旬气候学足迹存在差异。由图 6 可知,7 月上旬和下旬源区足迹分布在 LAS 光径的两侧,而中旬源区足迹主要分布在光径的西侧,其中,源区面积下旬 > 上旬 > 中旬。这是由于 7 月中旬时研究区强对流天气较多,空气流动性较强,风向较为单一,源区面积较小;上旬和下旬时大气较为稳定,垂直湍流较弱,风向不统一,导致通量源区面积较大。结合下垫面类型来看,上、中、下旬南侧发射端通量源区边界均落在小

chinaXiv:201910.00021v1

ChinaXiv合作期刊



注:南侧菱形为发射端,北侧菱形为接收端,虚线表示光径。下线各图菱形虚线均为相同含义。

图3　不同风向上 LAS 气候学足迹

Fig. 3　Climatological footprints of LAS at different wind directions

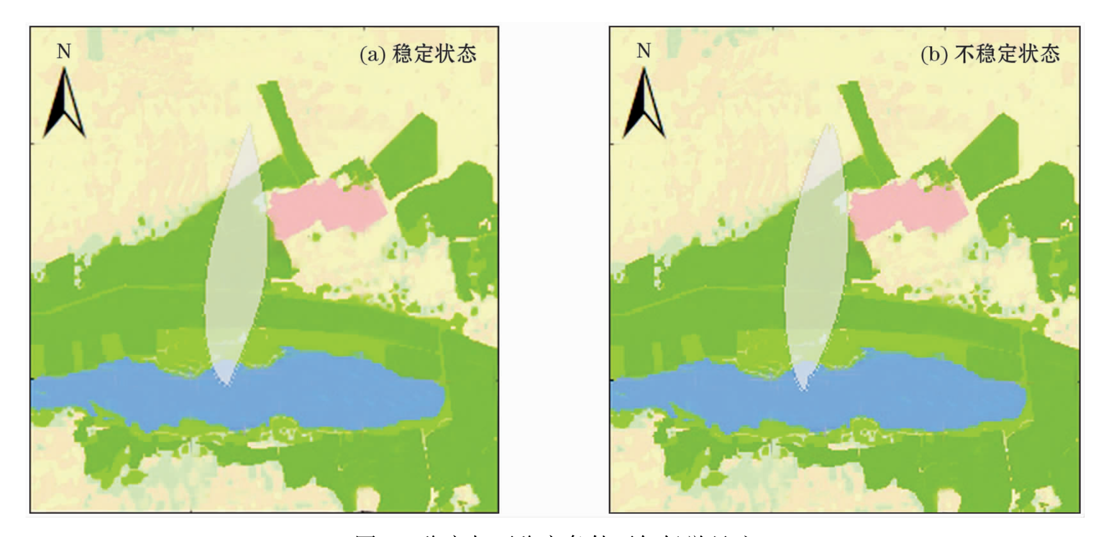


图4　稳定与不稳定条件下气候学足迹

Fig. 4　Climatological footprints under stable and unstable conditions

型湖泊内,下旬时沙丘下垫面面积显著大于上旬和中旬;各旬尺度内草甸和湖泊下垫面占比较小,农田下垫面为源区内占比最大的下垫面类型,各旬尺度风向统计结果如图 7 所示。

3　讨论与结论

为了了解荒漠化地区典型生态系统水热通量变化情况,本次实验对科尔沁沙地梯级生态带的水热

chinaXiv:201910.00021v1

ChinaXiv合作期刊

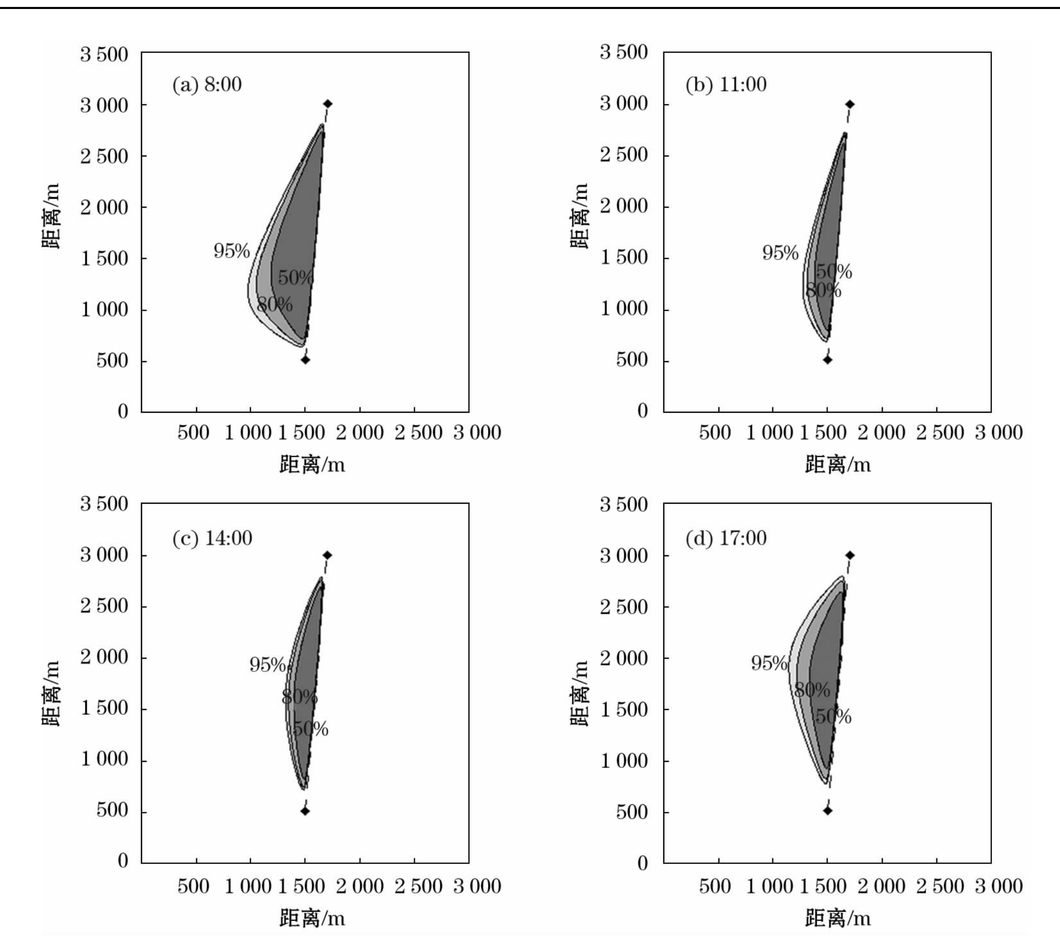


图 5　研究区日尺度气候学足迹

Fig. 5　Climatological footprints at daily scale in the study area

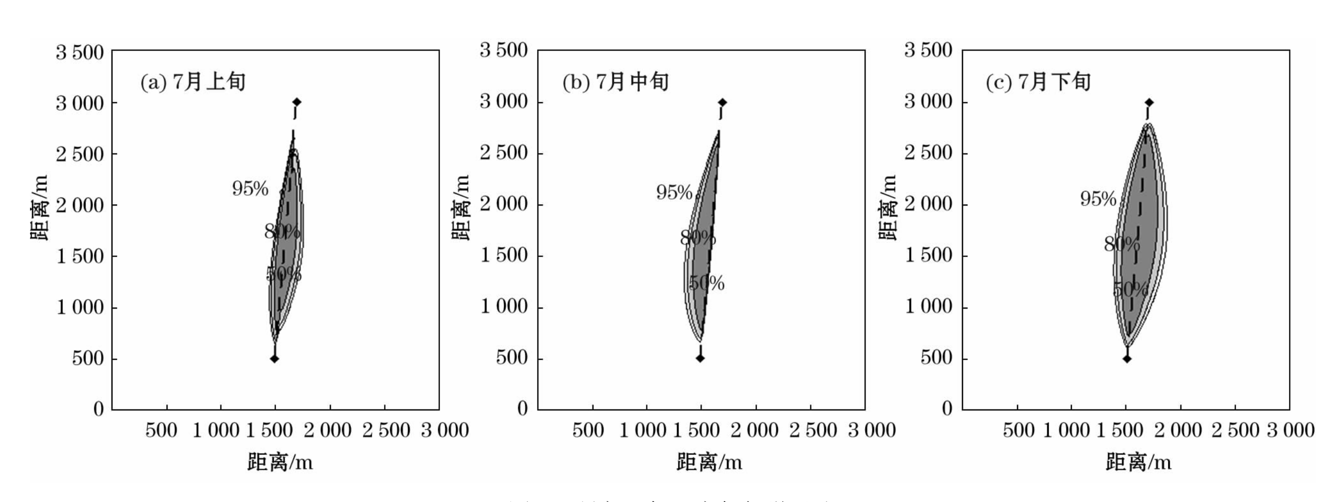


图 6　研究区旬尺度气候学足迹

Fig. 6　Climatological footprints at ten-day scale in the study area

通量日变化进行了研究。研究引入气候学足迹模型来反映实际下垫面贡献分布情况[7]。根据前人研究分析可知,风向和稳定度是影响气候学足迹变化的最主要因子[15]。故本文对研究时段内不同风向、稳定和不稳定状态下和不同时间尺度的气候学足迹进行了分析,以期合理评价科尔沁沙地梯级生态带上水热通量的空间代表性,为提高区域水热资源利用效率奠定基础。

本研究结果表明,研究区日尺度水热通量变化显著。晴天条件下各地表能量平衡分支通量呈单峰形,多云条件时则呈不规则的波动状。无论晴天还是多云天,显热通量峰值较低,与土壤热通量占比接

chinaXiv:201910.00021v1

ChinaXiv合作期刊

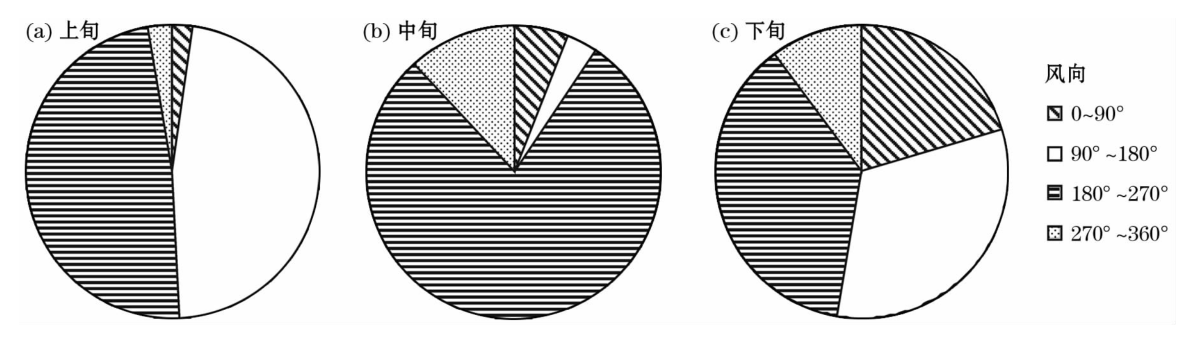


图 7　研究区 7 月各旬风向统计

Fig. 7　Statistic results of wind directions at ten-day scale in July in the study area

近;土壤热通量有明显错峰现象;潜热通量占净辐射比例较大,这说明潜热通量是研究时段内该地区地表耗能的主要形式。

不同风向和稳定度条件下,研究区气候学足迹变化显著,源区面积、位置与风向一致,风向与光径夹角较大时,源区面积较大。有研究表明[8,16],湍流不稳定状态下通量源区的面积小于湍流稳定状态时,这是因为在大气不稳定条件下,近地表地—气湍流波动剧烈,湍流垂直运动大于湍流横向运动,仪器观测得到的通量信息来自于迎风向较近的地方,导致通量源区面积较小;而在大气稳定条件下(通常是日出前,日落后),近地表地—气间湍流运动不频繁,横向湍流运动大于垂向运动,仪器观测得到的通量信息可以来自迎风方向较远的地方,故获得的通量源区面积更大。但本研究结果显示,研究区研究时段内湍流不稳定状态下的源区通量大于湍流稳定状态下,这是因为研究区下垫面条件复杂,地势不平坦,各下垫面海拔差异较大,仅以 LAS 接收端流动沙丘下垫面来看,相邻沙丘间海拔差异可达 5 ~ 10 m。对各站点风向、风速进行对比分析可知,不同站点的风速风向存在差异,这表明复杂的下垫面条件导致研究区内湍流运动不规律,形成独特的湍流运动模式。此外,对研究时段内的风速、风向研究可知,尽管研究时段内夜间平均风速小于日间,但某些夜间时段仍有大风情况出现,这表明研究区夜间会有较强的湍流运动出现。进一步分析表明,大风时段大多与降雨前后时段重合,尽管处理数据时剔除了降水时段数据,但降水时段前后湍流仍有变化,这也是导致湍流稳定条件时源区变小的原因。对不同时间尺度通量源区进行研究,结果表明,在不同时间尺度上,气候学足迹位置均与其所在时间段的盛行风向保持一致,但各时间尺度源区分布特征存在差异。日尺度上源区变化趋势与一天内湍流变化强弱趋势一致,一天内不同时刻源区分布差异较大,这表明仪器观测到的通量来源多来自迎风风向。旬尺度上,受天气与风向影响,7 月中旬源区面积较小且主要分布在光径西侧,上、下旬源区面积较大且源区分布在光径的两侧。旬尺度源区差异小于日尺度源区差异,与前人研究结果一致[4,17-18]。本次研究发现,研究时段内各时间尺度的通量源区大多位于光径西侧或光径西侧占比面积较东侧小,根据研究区各旬风向统计研究,这是因为研究时段内研究区的盛行风向为西南风,西风出现频次显著大于其余风向时,源区会落在光径西侧,而当非主风风向也占据一定比例时,源区会分布在光径两侧,但此时西南风风向上的平均风速更大,该风向上湍流运动更为剧烈,故通量源区面积较小;非主风风向上湍流运动较主风风向来说更为平缓,故通量源区面积较大,这也侧面印证了湍流稳定条件下源区面积比不稳定条件时大。结合下垫面类型来看,日尺度上源区下垫面变化较大;旬尺度上研究区下垫面以光径中段的农田玉米为主,光径两端的沙丘、草甸和湖泊下垫面占比较小,各下垫面占比随源区变化而变化。

参考文献(References):

〔1〕　刘罡,蒋维楣,罗云峰. 非均匀下垫面边界层研究现状与展望〔J〕. 地球科学进展,2005,20(2):223 - 230.〔Liu Gang, Jiang Weimei, Luo Yunfeng. Status quo and prospectsof researcheson atmospheric boundary layerover inhomogeneous underlying surface〔J〕. Advance in Earth Sciences,2005,20(2):223 -230.〕

〔2〕　刘绍民,李小文,施生锦,等. 大尺度地表水热通量的观测、分析与应用〔J〕. 地球科学进展,2010,25(11):1 113 - 1 127.〔Liu Shaomin, Li Xiaowen, Shi Shengjin, et al. Measurement, analysis and application of surface energy and water vapor fluxes at large scale〔J〕. Advances in Earth Science,2010,25(11):1 113 -1 127.〕

〔3〕　Baldocchi Dennis, Falge Eva, Gu Lianhong, et al. Fluxnet: A new

chinaXiv:201910.00021v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201910.00021v1

tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities〔J〕. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(11): 2 415 – 2 435.

〔4〕 宫丽娟, 刘绍民, 双喜, 等. 涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量的空间代表性〔J〕. 高原气象, 2009, 28(2): 246 – 257.〔Gong Lijuan, Liu Shaomin, Shuang Xi, et al. Investigation of spatial representativeness for surface flux measurements with eddy covariance system and large aperture scintillometer〔J〕. Plateau Meteorology, 2009, 28(2): 246 – 257.〕

〔5〕 Meijninger W M L, Beyrich F, Ludi A, et al. Scintillometer-Based turbulent fluxes of sensible and latent heat over a heterogeneous land surface: A contribution to litfass – 2003〔J〕. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 121: 89 – 110.

〔6〕 彭谷亮, 刘绍民, 蔡旭辉, 等. 非均匀下垫面湍流通量观测的印痕分析〔J〕. 大气科学, 2008, 32(5): 1 064 – 1 070.〔Peng Guliang, Liu Shaomin, Cai Xuhui, et al. Footprint analysis of turbulent flux measurement over heterogeneous surface〔J〕. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(5): 1 064 – 1 070.〕

〔7〕 李阳, 景元书, 秦奔奔. 低丘红壤区农田水热通量变化特征及气候学足迹〔J〕. 应用生态学报, 2017, 28(1): 180 – 190.〔Li Yang, Jing Yuanshu, Qin Benben. Characteristics of water and heat fluxes and its footprint climatology on farmland in low hilly region of red soil〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 180 – 190.〕

〔8〕 郑宁, 张劲松, 孟平, 等. 基于闪烁仪观测低丘山地人工混交林通量印痕与源区分布〔J〕. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1 175 – 1 186.〔Zheng Ning, Zhang Jinsong, Meng Ping, et al. Distribution of flux source area and footprint for the scintillation method over a mixed plantation in the hilly zone of the North China〔J〕. Advances in Earth Science, 2010, 25(11): 1 175 – 1 186.〕

〔9〕 马迪, 吕世华, 陈晋北, 等. 大孔径闪烁仪测量戈壁地区感热通量〔J〕. 高原气象, 2010, 29(1): 56 – 62.〔Ma Di, Lü Shihua, Chen Jinbei, et al. Surface sensible heat fluxes monitored by large aperture scintillometers at Gebi of Jinta〔J〕. Plateau Meteorology, 2010, 29(1): 56 – 62.〕

〔10〕 白洁, 刘绍民, 丁晓萍, 等. 大孔径闪烁仪观测数据的处理方法研究〔J〕. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1 148 – 1 165.〔Bai Jie, Liu Shaomin, Ding Xiaoping, et al. A study of the processing method of large aperture scintillometer observation data〔J〕. Advances in Earth Science, 2010, 25(11): 1 148 – 1 165.〕

〔11〕 Xu Ziwei, Liu Shaomin, Xu Tongren, et al. Comparison of the gap filling methods of evapotranspiration measured by eddy covariance system〔J〕. Advances in Earth Science, 2009, 24(4): 372 – 381.

〔12〕 Samain B W Defloor, Pauwelsn V R N. Continuous series of catchment-averaged sensible heat flux from a large aperture scintillometer: Efficient estimation of stability conditions and importance of fluxes under stable conditions〔J〕. Journal Hydrometeor, 2012 (13): 423 – 442.

〔13〕 Kormann R, Meixner F X. An analytic footprint model for non-neutral stratification〔J〕. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99: 207 – 224.

〔14〕 蔡旭辉, 朱明佳, 刘绍民, 等. 大孔径闪烁仪的通量印痕分析与应用〔J〕. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1 166 – 1 174.〔Cai Xuhui, Zhu Mingjia, Liu Shaomin, et al. Flux footprint analysis and application for the large aperture scintillometer〔J〕. Advances in Earth Science, 2010, 25(11): 1 166 – 1 174.〕

〔15〕 Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective〔J〕. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1 – 4): 159 – 183.

〔16〕 朱明佳, 赵谦益, 刘绍民, 等. 农田下垫面观测通量的变化特征及其气候学足迹分析〔J〕. 地球科学进展, 2013, 28(12): 1 313 – 1 325.〔Zhu Mingjia, Zhao Qianyi, Liu Shaomin, et al. Analysis of the characteristics of turbulent flux and its footprint climatology at an agricultural site〔J〕. Advances in Earth Science, 2013, 28(12): 1 313 – 1 325.〕

〔17〕 Meijninger W M L, Hartogensis O K, Kohsiek W, et al. Determination of area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface-flevoland field experiment〔J〕. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105(1): 37 – 62.

〔18〕 Ezzahar J, Chehbouni A, Hoedjes J C B, et al. The use of the scintillation technique for monitoring seasonal water consumption of olive orchards in a semi-arid region〔J〕. Agricultural Water Management, 2007, 89(3): 173 – 184.

ChinaXiv合作期刊

Climatological Footprints in Dune-Meadow Cascade Ecosystem under Different Meteorological Conditions in the Horqin Sandy Land

HUANG Tian-yu[1,2], WANG Guan-li[1,3], LI Dong-fang[1,3], DUAN Li-min[1,3], LIU Ting-xi[1,3]

(1. *College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *Inner Mongolia, China*;

2. *China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu* 610031, *Sichuang, China*;

3. *Inner Mongolia Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization, Hohhot* 010018, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: A cascade ecological belt in the Horqin Sandy Land in Inner Mongolia was taken as the study area to lucubrate the variation of water and heat fluxes and the climatological footprints in vegetation growth season 2017, and their values were calculated and analyzed by using the large aperture scintillometer (LAS) and the "FELM" footprint model. The results showed that: ① On sunny days, the curves of the branches of surface energy were unimodal, and the latent heat flux curve fluctuated slightly; on cloudy days, the curves of daily variation of surface energy fluctuated irregularly; ② The areas and locations of climatological footprints in the cascade ecological belt were different under different wind directions and different level of atmospheric stability, and the four source areas in the northeast, southeast, southwest and northwest of the study area in July 2017 were 0.265 km^2, 0.538 km^2, 0.239 km^2 and 0.524 km^2 respectively; ③ The source area under stable conditions was 0.599 km^2 and occupied 92% of that under unstable conditions; ④ On sunny days, the source area was reduced from 0.665 km^2 at 8:00 a.m. to 0.292 km^2 at 11:00 a.m. due to the strong turbulent exchange; in the afternoon, the turbulent exchange was weakened and the source area was enlarged from 0.283 km^2 at 14:00 to 0.479 km^2 at 17:00; ⑤ Affected by wind direction, atmospheric stability and other factors, the climatological footprints in early-, mid- and late-July were different. The source area was in an order of late- > early- > mid-July. The study results could provide a scientific basis and theoretical support for the sustainable utilization of hydrothermal resources and the environmental protection and regeneration in the Horqin Sandy Land under the complex conditions of underlying surface.

Key words: water and heat fluxes; climatological footprint; large aperture scintillometer; cascade ecological zone; source area; Horqin Sandy Land

chinaXiv:201910.00021v1